

日本国特許庁
JAPAN PATENT OFFICE

BSLB 703-205-8000
0020-5187P
Yagura
Oct. 29, 2003
20f2

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日
Date of Application: 2003年 9月10日

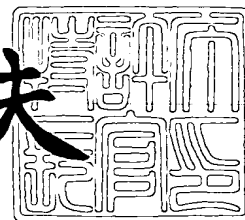
出願番号
Application Number: 特願2003-318668
[ST. 10/C]: [JP 2003-318668]

出願人
Applicant(s): シャープ株式会社

2003年10月10日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

今井康夫



出証番号 出証特2003-3083890

【書類名】 特許願
【整理番号】 189930
【提出日】 平成15年 9月10日
【あて先】 特許庁長官殿
【国際特許分類】 H01L 21/331
H01L 29/73
H01L 29/205

【発明者】
【住所又は居所】 大阪府大阪市阿倍野区長池町 2 2 番 2 2 号 シャープ株式会社内
【氏名】 矢倉 基次

【特許出願人】
【識別番号】 000005049
【住所又は居所】 大阪府大阪市阿倍野区長池町 2 2 番 2 2 号
【氏名又は名称】 シャープ株式会社

【代理人】
【識別番号】 100084146
【弁理士】
【氏名又は名称】 山崎 宏
【電話番号】 06-6949-1261
【ファクシミリ番号】 06-6949-0361

【選任した代理人】
【識別番号】 100100170
【弁理士】
【氏名又は名称】 前田 厚司
【電話番号】 06-6949-1261
【ファクシミリ番号】 06-6949-0361

【選任した代理人】
【識別番号】 100122286
【弁理士】
【氏名又は名称】 仲倉 幸典
【電話番号】 06-6949-1261
【ファクシミリ番号】 06-6949-0361

【先の出願に基づく優先権主張】
【出願番号】 特願2002-316011
【出願日】 平成14年10月30日

【手数料の表示】
【予納台帳番号】 204815
【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】
【物件名】 特許請求の範囲 1
【物件名】 明細書 1
【物件名】 図面 1
【物件名】 要約書 1
【包括委任状番号】 0208766

【書類名】特許請求の範囲

【請求項 1】

コレクタ層、ベース層およびエミッタ層を有するヘテロ接合バイポーラトランジスタであって、コレクタ層、ベース層およびエミッタ層が異なる格子定数 a_c 、 a_b および a_e をそれぞれ有し、 a_b は a_c および a_e の間の値である、ヘテロ接合バイポーラトランジスタ。

【請求項 2】

a_c 、 a_b および a_e が、 $a_c > a_b > a_e$ の関係を満たす、請求項 1 に記載のヘテロ接合バイポーラトランジスタ。

【請求項 3】

a_c 、 a_b および a_e が、 $a_c < a_b < a_e$ の関係を満たす、請求項 1 に記載のヘテロ接合バイポーラトランジスタ。

【請求項 4】

ヘテロ接合バイポーラトランジスタがエミッタアップ型であり、 a_e および a_b が、 $|a_e - a_b| / a_b \times 100 \leq 0.3$ (%) の関係を満たす、請求項 1～3 のいずれかに記載のヘテロ接合バイポーラトランジスタ。

【請求項 5】

a_e および a_b が、 $|a_e - a_b| / a_b \times 100 \leq 0.1$ (%) の関係を満たす、請求項 4 に記載のヘテロ接合バイポーラトランジスタ。

【請求項 6】

ヘテロ接合バイポーラトランジスタがエミッタアップ型であり、 a_b および a_c が、 $|a_b - a_c| / a_c \times 100 \leq 0.3$ (%) の関係を満たす、請求項 1～5 のいずれかに記載のヘテロ接合バイポーラトランジスタ。

【請求項 7】

a_b および a_c が、 $|a_b - a_c| / a_c \times 100 \leq 0.1$ (%) の関係を満たす、請求項 6 に記載のヘテロ接合バイポーラトランジスタ。

【請求項 8】

ヘテロ接合バイポーラトランジスタがコレクタアップ型であり、 a_c および a_b が、 $|a_c - a_b| / a_b \times 100 \leq 0.3$ (%) の関係を満たす、請求項 1～3 のいずれかに記載のヘテロ接合バイポーラトランジスタ。

【請求項 9】

a_c および a_b が、 $|a_c - a_b| / a_b \times 100 \leq 0.1$ (%) の関係を満たす、請求項 8 に記載のヘテロ接合バイポーラトランジスタ。

【請求項 10】

ヘテロ接合バイポーラトランジスタがコレクタアップ型であり、 a_b および a_e が、 $|a_b - a_e| / a_e \times 100 \leq 0.3$ (%) の関係を満たす、請求項 1～3、8 および 9 のいずれかに記載のヘテロ接合バイポーラトランジスタ。

【請求項 11】

a_b および a_e が、 $|a_b - a_e| / a_e \times 100 \leq 0.1$ (%) の関係を満たす、請求項 10 に記載のヘテロ接合バイポーラトランジスタ。

【請求項 12】

InGaP/GaAs ヘテロ接合を利用した、請求項 1～11 のいずれかに記載のヘテロ接合バイポーラトランジスタ。

【請求項 13】

InP/GaAs ヘテロ接合を利用した、請求項 1～11 のいずれかに記載のヘテロ接合バイポーラトランジスタ。

【請求項 14】

エミッタ層が第 1 エミッタ層および第 2 エミッタ層を含み、第 1 エミッタ層はベース層と第 2 エミッタ層との間に挟まれ、第 1 エミッタ層および第 2 エミッタ層は格子定数 a_{e1} および a_{e2} をそれぞれ有し、 a_{e2} は a_e に対応し、 a_{e2} および a_b が、 $|a_{e2}$

$-a_b | / a_b \times 100 > 0.3 (\%)$ の関係を満たす、請求項 1～3 のいずれかに記載のヘテロ接合バイポーラトランジスタ。

【請求項 15】

コレクタ層が第 1 コレクタ層および第 2 コレクタ層を含み、第 1 コレクタ層はベース層と第 2 コレクタ層との間に挟まれ、第 1 コレクタ層および第 2 コレクタ層は格子定数 a_{c1} および a_{c2} をそれぞれ有し、 a_{c2} は a_e に対応し、 a_{c2} および a_b が、 $-a_b | / a_b \times 100 > 0.3 (\%)$ の関係を満たす、請求項 1～3 のいずれかに記載のヘテロ接合バイポーラトランジスタ。

【請求項 16】

a_b は接合温度において a_c および a_e の間の値である、請求項 1～15 のいずれかに記載のヘテロ接合バイポーラトランジスタ。

【書類名】 明細書

【発明の名称】 ヘテロ接合バイポーラトランジスタ

【技術分野】

【0001】

本発明はヘテロ接合バイポーラトランジスタ（以下、HBTとも言う）に関する。

【背景技術】

【0002】

III-V族化合物半導体を用いたヘテロ接合バイポーラトランジスタは、1種の方法系から成るバイポーラトランジスタに比べて優れた高周波特性および高い電流駆動能力を示すことから、光通信、マイクロ波帯およびミリ波帯での通信等に用いられ、例えば移動体通信機器、光通信システムの高周波素子および高出力素子などに実用化され始めている。

【0003】

HBTの実用化に際しては、その信頼性の向上を図ることが特に重要である。HBTの信頼性を向上させるために種々の提案がなされているものの、特に、パワーデバイスで用いるような大電流をHBTに流した場合に、HBTに起因した素子の劣化が起こることがあり、HBTの信頼性の向上は未だ十分ではない。

【0004】

この主な原因としては、AlGaAs/GaAs HBTのGaAsベース層にp型ドーパントとして、近年、Beに代えて一般的にドーピングされているCが、ベース層のGaおよびAsよりも原子半径が小さいため、特に高濃度にドーピングした場合にベース層に歪を生じ、そこが再結合中心になって、電流増幅率の低下、ひいては信頼性の低下を招くことが考えられている。

【0005】

この対策として、CがドーピングされたGaAsベース層に、ベース層を構成する原子と異なるIII族またはV族の元素を添加することが提案されている（特許文献1を参照のこと）。この方法によれば、ベース層を構成する原子であるGaおよびAsに比べて原子半径が大きい不純物、例えばInまたはSbをドーパントとして添加することにより、ベース層の歪を緩和することができ、これによりHBTの信頼性の向上を図っている。

【0006】

もう1つの対策として、GaAsベース層のドーパントとして、III族またはV族以外の原子から構成される不純物であって、ベース層を構成する原子に比べて原子半径が大きい不純物と、原子半径が小さい不純物とを用いることも提案されている（特許文献2を参照のこと）。この方法によれば、ベース層を構成する原子であるGaおよびAsに比べて、原子半径が大きい不純物、例えばMgと、原子半径が小さい不純物、例えばCとをドーパントとして添加することにより、GaまたはAsとの化合物を形成することを回避しつつ、ベース層の歪を緩和することができ、これによりHBTの信頼性の向上を図っている。

【0007】

後者の対策による従来のHBTの例について、以下、図面を参照しながら説明する（特許文献2の図1に関する実施の形態を参照のこと）。図7に示すように、従来のHBT600においては、半絶縁性GaAs基板601の上に、i-GaAsまたはi-AlGaAsバッファ層602、Siをドーピングしたn-GaAsコレクタ層603、CおよびMgをドーピングしたp-GaAsベース層604、Siをドーピングしたn-AlGaAsまたはn-InGaPエミッタ層605、およびSiを高濃度にドーピングしたn⁺-GaAsエミッタキャップ層606が、エピタキシャル成長により順次積層されて形成されている。また、n⁺-GaAsエミッタキャップ層606、n-AlGaAsまたはn-InGaPエミッタ層605およびp-GaAsベース層604を適宜ドライエッチングし、n⁺-GaAsエミッタキャップ層606の上にはWSiエミッタ電極609が、n-GaAsコレクタ層603の上にはNi/AuGe/Auコレクタ電極607が、p-GaAsベース層604の上にはTi/Pt/Auベース電極608がそれぞれ形成

されている。この HBT600 は、エミッタ層材料が $n\text{-AlGaAs}$ である場合には AlGaAs/GaAs HBT と呼ばれ、エミッタ層材料が $n\text{-InGaP}$ エミッタ層である場合には InGaP/GaAs HBT と呼ばれる。 InGaP/GaAs HBT は、 AlGaAs/GaAs HBT に比べて寿命が長く、信頼性が高いことが知られている。

【0008】

【特許文献 1】特開平 6-37105 号公報

【特許文献 2】特開 2000-323491 号公報

【非特許文献 1】H. Sugahara, 外 3 名, 「歪が緩和されたベースを有する AlGaAs/GaAs ヘテロ接合バイポーラトランジスタの改善された信頼性 (IMPROVED RELIABILITY OF AlGaAs/GaAs HETEROJUNCTION BIPOLAR TRANSISTORS WITH A STRAIN-RELAXED BASE)」, IEEE GaAs IC Symposium Technical Digest, 1993 年, p. 115-118

【非特許文献 2】川野明弘, 外 6 名, 「C ドープ InGaP/GaAs HBT の信頼性」, 1997 年電子情報通信学会総合大会講演論文集, 電子情報通信学会, 1997 年, SA-8-1, p 474-475

【非特許文献 3】Sandeep R. Bahl, 外 5 名, 「 InGaP/GaAs ヘテロ接合バイポーラトランジスタの信頼性調査 (Reliability Investigation of InGaP/GaAs Heterojunction Bipolar Transistor)」, International Electron Devices Meeting Digest, 1995 年, p. 815-818

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

しかしながら、従来からドーパントとして通常用いられている C に加えて In、Sb または Mg などの新たな元素をベース層にドーピングするには、エピタキシャル成長技術を利用した既存の設備をそのまま利用することはできず、少なくともこれを大幅に改造するか、新規な設備を構築する必要がある。

【0010】

また、C に加えて In、Sb または Mg 等の元素をドーピングしたベース層は、In、Sb または Mg 等の元素をドーピングしないベース層よりもドライエッチング速度が極端に遅くなる。前者のベース層をエッチングするためには、従来とは異なるガスを導入してドライエッチングを行うか、またはイオンミリングを行う必要がある。特に、イオンミリングを用いる場合には、エッチングマスクとベース層のエッチング量がほぼ同等となるため（換言すれば、高い選択性を得ることが困難であるため）、エッチングマスクの膜厚を厚く形成しなければならない。しかしながら、段差のある層上に厚いエッチングマスクを微細なパターンで形成することは困難である。いずれにしても、エッチング技術を利用した既存の設備および製造工程を大幅に変更する必要がある。

【0011】

本発明の目的は、HBT を製造するための既存の製造設備および製造工程を大幅に変更することなく、高信頼性の HBT を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0012】

HBT の信頼性試験においては温度による加速試験が一般的に行われている。このような温度加速信頼性試験（以下、単に信頼性試験と言う）においては、反応速度論モデルの 1 つである、いわゆるアレニウスモデルが用いられている。このモデルは以下の式 (1) により表されることが知られている。

【数 1】

$$L = A \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \cdots (1)$$

式中、 L は寿命時間(h)、 A は定数(h)、 E_a は活性化エネルギー(eV)、 k はボルツマン定数(約 8.61×10^{-5} eV/K)、 T は温度(K)である。本明細書において、寿命時間 L は、HBTの故障までの平均時間MTTF (Mean Time To Failure) (h)に対応し、温度 T はHBTの接合温度 T_j (°C)を絶対温度(K)に換算したものである。尚、接合温度は、一般的にはデバイスにおいて最も高温となる場所の温度を言い、HBTではコレクタ層の温度を指すと考えられる。本明細書において接合温度 T_j (°C)は、以下の式(2)により求めるものとする。

【数2】

$$T_j = T_s + R \times P \quad \cdots (2)$$

式中、 T_s は環境温度(または周囲温度) (°C)、 R はHBTの熱抵抗(°C/W)、 P はHBTに供給した電力(W) (即ち、コレクターエミッタ間の電圧 V_{ce} (V) とコレクタ電流 I_c (A) との積) である。

【0013】

一般的には、種々の温度条件下にてHBTの信頼性試験を実施してMTTFを測定し、縦軸にMTTFの対数を取り、横軸に温度の逆数をとったアレニウスプロットを行うと、単一の故障モードでは、プロットしたデータがほぼ直線上に位置し、この直線の傾きから活性化エネルギー E_a が求められる。

【0014】

本発明者はHBTの高信頼化を図るため、新たな観点から、信頼性試験における活性化エネルギーに着目した。

【0015】

本発明者は、HBTの1つの例として、ベース層にCのみをドーピングした点を除いて、図7に示す従来のHBT600と同様の構造を有するInGaP/GaAs HBT (a) を作製し、接合温度 T_j を約270~290°Cの範囲で種々に変化させて信頼性試験を行った。信頼性試験の通電条件は、エミッターコレクタ間の電圧 $V_{ce} = 3.0$ V、および電流密度 $J_c = 50$ kA/cm² とした。そして、得られたMTTFのデータ(サンプル数: $N = 10$) をアレニウスプロットして、最小二乗法により回帰直線(a)を得た。この結果を図8に示す。直線(a)の傾きから求めた活性化エネルギーは約0.7 eVであった。

【0016】

これに加えて、信頼性試験により得られたHBTの活性化エネルギーの値がこれまで種々報告されている。例えば、ベース層にCをドーピングしたInGaP/GaAs HBT (a) と同様の構成を有するInGaP/GaAs HBTが、約0.7 eVの活性化エネルギーを示すことが報告されている(例えば非特許文献3を参照のこと)。

【0017】

もう1つのHBTの例として、ベース層にCおよびMgをドーピングした、図7に示すHBT600と同様の構造を有するInGaP/GaAs HBT (b) の信頼性試験の結果を推測して直線(b)を得た(具体的には、非特許文献1および特許文献2の開示内容に基づいて推測した)。この結果も図8に併せて示す。図8を参照して、ベース層にCのみをドーピングしたHBT (a) の直線(a)よりも、ベース層にCおよびMgをドーピングしたHBT (b) の直線(b)のほうが上方にシフトしており、ある温度におけるMTTFは増加していた。換言すれば、ベース層にCのみをドーピングした場合よりも、ベース層にCに加えてMgをドーピングした場合のほうが、HBTの寿命が延びていることがわかる。しかしながら、HBT (b) について、直線(b)の傾きから求められる活性化エネルギーは、HBT (a) と同様に約0.7 eVであり、実質的な相違は見られなかった。

【0018】

また、ベース層にCに加えてInまたはSbをドーピングしたHBTについての信頼性試験の結果も報告されているが、この場合にも、ベース層にCおよびMgをドーピングし

た HBT (b) と同様の結果が得られている。例えば、ベース層に C および In をドーピングした AlGaAs/GaAs HBT が、HBT (b) の場合とほぼ同様に、ベース層に C のみをドーピングした場合よりも寿命が延びているものの、活性化エネルギーは 0.45 eV であり、小さいことが報告されている (例えば非特許文献 1 を参照のこと)。

【0019】

更に、ベース層に C のみをドーピングした InGaP/GaAs HBT (c) の信頼性試験の結果 (通電条件: エミッターコレクタ間の電圧 $V_{ce} = 2.4 \sim 2.5$ V、および電流密度 $J_c = 60 \text{ kA/cm}^2$) も発表されている (非特許文献 2 の図 4 を参照のこと)。この結果を直線 (c) として図 8 に併せて示す。HBT (c) では、ベース層に C のみをドーピングしており、歪を低減し得るようなその他の元素はドーピングされていない。しかしながら、HBT (c) では、本発明者が比較のために作製した HBT (a) に比べて、ある温度における MTTF が増大しているだけでなく、約 2.0 eV の大きな活性化エネルギーを示している。活性化エネルギーが大きいことは直線 (c) の傾きが大きいことを意味しており、低温側 (即ちグラフ右側) での寿命 (MTTF) の延びが大きくなる。例えば、接合温度 T_j が 240℃ であるときの寿命 (MTTF) は、約 0.7 eV の活性化エネルギーを有する HBT (b) では約 3×10^3 時間であるのに対して、約 2.0 eV の活性化エネルギーを有する HBT (c) では約 4×10^4 時間であり、HBT (b) の約 10 倍の寿命となっている。

【0020】

本発明者は、HBT (c) の信頼性試験の結果を他の HBT、特に HBT (a) の場合と比較して考察することにより、従来から一般的にベース層のドーパントとして使用されている C (または Be) に加えて、他の元素をドーピングしなくても、活性化エネルギーを増加させることによって、特に実際の HBT 使用温度に近い低温側における HBT の寿命を長くでき、HBT の信頼性を向上させることが可能となるという知見を得た。

【0021】

しかしながら、InGaP/GaAs HBT に限って見ても、その活性化エネルギーの値は様々であり、HBT (c) が HBT (a) や、HBT (b) およびその他報告されている HBT の活性化エネルギー (特に非特許文献 3 を参照のこと) に比べて、大きな活性化エネルギー (これは、低温側における寿命の延びをもたらす) を示す原因は明らかでない。

【0022】

本発明者は、HBT の高信頼性を向上させるべく、活性化エネルギーに影響を与える要素について鋭意検討した結果、本発明を完成するに至った。

【0023】

本発明によれば、コレクタ層、ベース層およびエミッタ層を有するヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT) であって、コレクタ層、ベース層およびエミッタ層が異なる格子定数 a_c 、 a_b および a_e をそれぞれ有し、 a_b は a_c および a_e の間の値である HBT が提供される。 a_c は a_b および a_e より大きくても小さくてもよいことに留意されたい。換言すれば、 a_c 、 a_b および a_e の大きさがその順番で降順または昇順になっていることを意味する。即ち、 a_c 、 a_b および a_e は $a_c > a_b > a_e$ または $a_c < a_b < a_e$ の数値的關係を満たす。

【0024】

尚、本発明において格子定数 a_b 、 a_c および a_e は、いずれも、次のようにして測定することができる。まず、HBT の製造プロセスにおける、ベース層を成長 (代表的にはエピタキシャル成長) させるときと同じ条件で、(001) 面の基板上にベース層と実質的に同じ層 (以下、単に擬ベース層と言う) を成長させ、擬ベース層を有するサンプルを得る。このとき、擬ベース層の膜厚は 3000 Å とする。次に、X 線回折装置を用いて、サンプルの (004) 面のブラッグ反射のロックングカーブを $\theta - 2\theta$ スキャンで測定する。これにより、基板のピーク角度と基板上に成長させた擬ベース層のピーク角度が得られる。これら得られたピーク角度の値は一般的に多少のずれを含んでいるため、擬ベース

層について得られたピーク角度の値をそのまま採用することはできないが、これらピーク角度の差の値は信頼でき、また、基板固有のピーク角度の値は既知であることから、擬ベース層のピーク角度の値を補正して求めることができる。次に、このようにして求めた擬ベース層のピーク角度 θ を用いて、ブラッグの式 ($2d \sin \theta = n\lambda$: 式中、 d は格子定数、 λ は用いた X 線の波長、 n は自然数 (1、2、3・・・)) より擬ベース層の格子定数 d を求める。得られた擬ベース層の格子定数 d を、HBT のベース層の格子定数 a_b と見なして実質的に差し支えない。また、HBT のコレクタ層の格子定数 a_c およびエミッタ層の格子定数 a_e についても同様にして測定することができる。尚、X 線装置には、フィリップス製 X 線回折装置 (4 結晶モノクロメータ付き)、型式: MPD1880HR (入射 X 線 CuK α 線) を用いることができる。

【0025】

本発明によれば、 a_c 、 a_b および a_e を降順または昇順として、歪ませる方向を規定して a_c 、 a_b および a_e の関係を適切に選択している。この結果、従来よりも大きな活性化エネルギーを与える HBT が実現され、これにより、HBT の寿命 (より詳細には MTTF) を従来よりも延ばすことができる。本発明の HBT の寿命は、特に低温側、換言すれば実使用温度に近い温度において延びが著しい。

【0026】

本発明を拘束するものではないが、本発明によって HBT の寿命が延びるのは以下の理由によるものと考えられる。デバイスが劣化していく 1 つの原因として、結晶格子中に存在する転位が移動することが考えられる。より詳細には、結晶格子中で発生した歪によって転位に力が働き、従来、その力によって転位が移動し、やがて例えばベース層とエミッタ層の界面まで達して、デバイスが故障していたものと考えられる。ここで、転位が移動するには、転位の移動を妨げるエネルギー障壁を越える大きい力 (またはエネルギー) が転位に働く必要があると考えられる。これに対して、本発明のように a_c 、 a_b 、 a_e の関係を適切に選択し、歪ませる方向を規定することによって、転位に働く力を低く抑えることができ、転位の移動が起こり難くなって、結果的に HBT の寿命が延びるものと考えられる。

【0027】

また、本発明によれば、図 7 を参照して説明した従来の HBT のように、ベース層の歪を緩和するための元素を新たにドーピングする必要がないため、エピタキシャル成長技術およびエッチング技術を利用した既存の製造設備および製造方法を大幅に変更する必要がない。

【0028】

要するに、本発明によれば、エピタキシャル成長技術およびエッチング技術を利用した既存の製造設備および製造工程を大幅に変更することなく、長寿命、換言すれば高信頼性の HBT を提供することができる。

【0029】

本発明の 1 つの態様においては、コレクタ層、ベース層およびエミッタ層のうちの隣接する二層間の格子不整合率、より具体的には、エミッタ層ーベース層間の格子不整合率およびベース層ーコレクタ層間の格子不整合率の少なくとも一方、好ましくは双方が、0.3% 以下、好ましくは約 0.1% 以下である。用語「格子不整合率」は、二層の各格子定数の差の絶対値を、これら二層のうち相対的に下側に位置する層の格子定数の値で除した値を百分率表記したものを言う。尚、このような格子不整合率の定義により、その理論最小値はゼロであることが容易に理解されよう。

【0030】

より具体的には、本発明の HBT はいわゆるエミッタアップ型およびコレクタアップ型のいずれであってもよいが、エミッタアップ型 HBT の場合、ベース層に対するエミッタ層の格子不整合率 (%) (即ち、 $|a_e - a_b| / a_b \times 100$) が約 0.3% 以下、好ましくは約 0.1% 以下である。換言すれば、 a_e および a_b が、 $|a_e - a_b| / a_b \times 100 \leq 0.3$ (%) の関係を満たし、好ましくは $|a_e - a_b| / a_b \times 100 \leq 0$

・ 1 (%) の関係を満たす。また、エミッタアップ型 HBT の場合、コレクタ層に対するベース層の格子不整合率 (%) (即ち、 $|a_b - a_c| / a_c \times 100$) が約 0.3 % 以下、好ましくは約 0.1 % 以下である。換言すれば、 a_b および a_c が、 $|a_b - a_c| / a_c \times 100 \leq 0.3$ (%) の関係を満たし、好ましくは $|a_b - a_c| / a_c \times 100 \leq 0.1$ (%) の関係を満たす。

・ 【0031】

また、コレクタアップ型 HBT の場合、ベース層に対するコレクタ層の格子不整合率 (%) (即ち、 $|a_c - a_b| / a_b \times 100$) が約 0.3 % 以下、好ましくは約 0.1 % 以下である。換言すれば、 a_c および a_b が、 $|a_c - a_b| / a_b \times 100 \leq 0.3$ (%) の関係を満たし、好ましくは $|a_c - a_b| / a_b \times 100 \leq 0.1$ (%) の関係を満たす。また、コレクタアップ型 HBT の場合、エミッタ層に対するベース層の格子不整合率 (%) (即ち、 $|a_b - a_e| / a_e \times 100$) が約 0.3 % 以下、好ましくは約 0.1 % 以下である。換言すれば、 a_b および a_e が、 $|a_b - a_e| / a_e \times 100 \leq 0.3$ (%) の関係を満たし、好ましくは $|a_b - a_e| / a_e \times 100 \leq 0.1$ (%) の関係を満たす。

・ 【0032】

・ このように、コレクタ層、ベース層およびエミッタ層のうちの隣接する二層間の格子不整合率を約 0.3 % 以下、好ましくは約 0.1 % 以下として、歪ませる程度を適切に選択することによって、より大きな活性化エネルギー、例えば約 2.0 eV 以上、好ましくは約 3.0 eV 以上の活性化エネルギーを与える HBT が実現される。このような HBT は、実使用温度範囲において寿命の延びが著しく、好ましくは、従来の約 10 倍以上の寿命を有する高信頼性の HBT が提供される。

・ 【0033】

本発明の好ましい態様においては、エミッタアップ型 HBT の場合、ベース層に対するエミッタ層の格子不整合率およびコレクタ層に対するベース層の格子不整合率の双方が約 0.3 % 以下であり、より好ましくは約 0.1 % 以下とされる。また、コレクタアップ型 HBT の場合、ベース層に対するコレクタ層の格子不整合率およびエミッタ層に対するベース層の格子不整合率の双方が約 0.3 % 以下であり、より好ましくは約 0.1 % 以下とされる。これにより、活性化エネルギーの増加、ひいては実使用温度範囲における寿命の延びを更に増大させることができる。

・ 【0034】

・ 本発明においては、上記のような格子不整合率は、約 0.3 % 以下で 0 % を超えた範囲において、小さい値であるほど大きな活性化エネルギーが得られるため好ましい。しかしながら、層の材料組成およびドーピング濃度における、エピタキシャル成長時の層厚方向でのばらつきや、ウェハ面内でのばらつき等を考慮すると、上記の格子不整合率はいずれも、現実的には約 0.01 % ~ 0.3 % が好ましく、約 0.01 % ~ 0.1 % がより好ましい。

・ 【0035】

コレクタ層の格子定数 a_c 、ベース層の格子定数 a_b およびエミッタ層の格子定数 a_e は、例えば各層にドーピングするドーパントの濃度を調節することによって可変である。特に、これら層の材料として 3 元混晶の化合物半導体を用いている場合には、混晶比を調節することによって可変である。ドーパント濃度および/または混晶比の調節は、例えば、ドーピング材料 (例えばガス) の流量、原料ガスの流量比等を適宜制御することによって、当業者には容易になされ得るであろう。また、その他の事項について特に説明しないが、エミッタアップ型 HBT およびコレクタアップ型 HBT のいずれであっても、当該技術分野において既知の製造方法を利用して、本発明の HBT を作製することができるであろう。

・ 【0036】

このような半導体層の格子定数は一般に温度上昇につれて増加し、具体的には以下の式 (3) で近似できることが知られている。

【数 3】

$$\alpha = \alpha_0 \times (1 + \beta \times (T_1 - T_0)) \quad \dots (3)$$

式中、 T_0 は基準温度 (K) (但し、 $T_0 = 300 \text{ K}$)、 α_0 は基準温度 T_0 における格子定数 (Å)、 T_1 は所定温度 (K)、 α は所定温度 T_1 における格子定数 (Å)、 β は膨張率 (K^{-1}) である。尚、 β は半導体層の材料に依存して異なる値である。

【0037】

本発明において、上述の格子定数 a_c 、 a_b 、 a_e の関係 (およびこれらから求められる格子不整合率の範囲) は、全温度において達成される必要はなく、少なくとも接合温度 T_j において満たされていればよい。上記関係が接合温度 T_j において確保されることにより、HBT の長寿命化および信頼性の向上の効果を得ることができる。

【0038】

本発明の 1 つの態様において、エミッタ層は格子定数 a_{e1} および a_{e2} をそれぞれ有する第 1 エミッタ層および第 2 エミッタ層の二層 (第 1 エミッタ層はベース層と第 2 エミッタ層との間に挟まれる) から成っていてよい。この場合、第 2 エミッタ層の格子定数 a_{e2} が上述の $a_c > a_b > a_e$ または $a_c < a_b < a_e$ の関係に言う格子定数 a_e として採用される。即ち、 a_c 、 a_b および a_{e2} が $a_c > a_b > a_{e2}$ または $a_c < a_b < a_{e2}$ の関係を満たす。第 2 エミッタ層の格子定数 a_{e2} はベース層の格子定数 a_b と比較的大きくずれていてよく、 a_{e2} および a_b は、 $|a_{e2} - a_b| / a_b \times 100 > 0.3 (\%)$ の関係を満たしてよい。他方、第 1 エミッタ層の格子定数 a_{e1} はベース層の格子定数 a_b に近くてよく、第 1 エミッタ層とベース層との間の格子不整合率は、例えば 0.1% 以下であり得る。尚、 a_{e1} は a_b と実質的に等しく、互いに格子整合していてもよい。

【0039】

従来の一般的な HBT では、エミッタ層はベース層と格子整合し、エミッタ層およびベース層の格子定数が実質的に同じになるように設計されている。しかしながら、 $a_c > a_b > a_e$ または $a_c < a_b < a_e$ の関係を満たすため、エミッタ層およびベース層の格子定数がずれるようにエミッタ層およびベース層の材料を選択した結果、従来の HBT とバンドギャップが変わり、エミッターベース間において所望のバンド構造が得られず、HBT の特性変化を招くことがあり得る。特にエミッターベースのバンド構造変化は、HBT の高周波特性やオン電圧の変化をもたらすため望ましくない場合がある。

【0040】

このような場合、エミッタ層を一層とせずに、上記のように第 1 エミッタ層と第 2 エミッタ層との二層に分けることが好ましい。第 1 エミッタ層の格子定数 a_{e1} を所望のバンド構造 (より詳細にはエミッターベース間のバンドギャップ) が得られるように制御し、第 2 エミッタ層の格子定数 a_{e2} をベース層の格子定数 a_b に対して大きく歪ませるように制御する。これにより、ベース層に対する第 2 エミッタ層の格子不整合による歪の影響が第 1 エミッタ層とベース層に及び、ベース層とエミッタ層との接合部分での転位に働く力が小さくなるので、HBT の特性変化を回避しつつ、長寿命で高信頼性の HBT を得ることができる。

【0041】

本発明のもう 1 つの態様において、コレクタ層は格子定数 a_{c1} および a_{c2} をそれぞれ有する第 1 コレクタ層および第 2 コレクタ層の二層 (第 1 コレクタ層はベース層と第 2 コレクタ層との間に挟まれる) から成っていてもよい。この場合、第 2 コレクタ層の格子定数 a_{c2} が上述の $a_c > a_b > a_e$ または $a_c < a_b < a_e$ の関係に言う格子定数 a_c として採用される。即ち、 a_{c2} 、 a_b および a_e が $a_{c2} > a_b > a_e$ または $a_{c2} < a_b < a_e$ の関係を満たす。第 2 コレクタ層の格子定数 a_{c2} はベース層の格子定数 a_b と比較的大きくずれていてよく、 a_{c2} および a_b は、 $|a_{c2} - a_b| / a_b \times 100 > 0.3 (\%)$ の関係を満たしてよい。他方、第 1 コレクタ層の格子定数 a_{c1} はベース層の格子定数 a_b に近くてよく、第 1 コレクタ層とベース層との間の格子不整合率は、例

えば0.1%以下であり得る。尚、 a_{c1} は a_b と実質的に等しく、互いに格子整合していてもよい。本態様は、コレクターベース間において所望のバンド構造が得られず、HBTの特性変化を招く場合に有効である。この態様では、第1コレクタ層の格子定数 a_{c1} を所望のバンド構造（より詳細にはコレクターベース間のバンドギャップ）が得られるように制御し、第2コレクタ層の格子定数 a_{c2} をベース層の格子定数 a_b に対して大きく歪ませるように制御することによって、上記と同様の効果が得られる。

【0042】

尚、エミッタ層およびコレクタ層を二層にする場合も、各格子定数の関係は全温度において達成される必要はなく、少なくとも接合温度 T_j において満たされていればよい。

【0043】

また、エミッタ層およびコレクタ層のいずれかのみならず、これらの双方を二層にしてもよい。エミッタ層およびコレクタ層を二層にする態様における本発明のHBTは、エミッタアップ型およびコレクタアップ型のいずれであってもよい。

【0044】

本発明のHBTは、例えばIII-V族またはII-VI族のHBTであり得る。III-V族HBTには、In、GaおよびAlなどの少なくとも1種のIII族元素と、P、As、SbおよびNなどの少なくとも1種のV族元素とを含む材料層が用いられる。例えば、InGaP/GaAsヘテロ接合、InP/InGaAsヘテロ接合などを利用したIII-V族HBTであり得る。II-VI族HBTには、Znなどの少なくとも1種のII族元素と、Seなどの少なくとも1種のVI族元素とを含む材料層が用いられる。例えば、Zn/Seヘテロ接合を利用したII-VI族HBTであり得る。

【0045】

尚、当該技術分野において知られているように、HBTにおいて、エミッタ層とベース層とがヘテロ接合されていても、ベース層とコレクタ層とがヘテロ接合されていてもよく、また、エミッタ層とベース層およびベース層とコレクタ層の双方がヘテロ接合されていてもよい。

【0046】

また、本発明のHBTは、npn型およびpnp型のいずれであってもよい。

【発明の効果】

【0047】

本発明によれば、エピタキシャル成長技術およびエッチング技術を利用した既存の製造設備および製造工程を大幅に変更することなく、高信頼性のHBTを提供することができる。より具体的には、特殊な元素をドーピングしなくても、歪みの方向を規定するように a_c 、 a_b および a_e の関係を適切に選択することにより、より大きな活性化エネルギーを与えるHBTが実現される。これにより、HBTの寿命（より詳細にはMTTF）を従来のHBTに比べて延ばすことができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0048】

（実施形態1）

本実施形態は、エミッタアップ型のInGaP/GaAs HBTおよびその製造方法に関する。図1(a)～(c)は、本実施形態のHBT100の製造方法を、積層方向を含む概略断面を示して説明する工程図である。

【0049】

図1(c)に示すように、本実施形態のHBT100は、基板101（半絶縁性GaAs基板、厚さ 約600 μ m）の上に、バッファ層102（i-GaAs層、厚さ 約250nm）、サブコレクタ層103（n-GaAs層、Siドーピング、ドーパント濃度 約 5×10^{18} cm⁻³、厚さ 約500nm）、コレクタ層104（n-GaAs層、Siドーピング、ドーパント濃度 約 2×10^{16} cm⁻³、厚さ 約700nm）、ベース層105（p-GaAs層、Cドーピング、ドーパント濃度（C濃度）は後述するように選択する、厚さ 約80nm）、エミッタ層106（n-In_yGa_{1-y}P層（

yは後述するように選択する)、Siドーピング、ドーパント濃度 $\text{約} 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、厚さ $\text{約} 25 \text{ nm}$)、コンタクト層107 (n-GaAs層、Siドーピング、ドーパント濃度 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、厚さ $\text{約} 50 \text{ nm}$)、 그레이ディッド層108 (n-In_xGa_{1-x}As層 ($x=0 \rightarrow 0.5$ 、積層方向に徐々にxが変化する)、Siドーピング、ドーパント濃度 $\text{約} 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、厚さ $\text{約} 50 \text{ nm}$)、およびキャップ層109 (n-In_zGa_{1-z}As層 ($z=0.5$)、Siドーピング、ドーパント濃度 $\text{約} 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、厚さ $\text{約} 50 \text{ nm}$) が順次積層された構造を有する。このHBT100において、図1(c)に示すように、エミッタ電極110 (WN/Pt/Ti/Pt/AuまたはWSi/Pt/Ti/Pt/Au、全体厚さ $\text{約} 300 \text{ nm}$) がキャップ層109の上に、ベース電極111 (Pt/Ti/Pt/Au、全体厚さ $\text{約} 200 \text{ nm}$) がエミッタ層106の上に、コレクタ電極112 (AuGe/Ni/Au、全体厚さ $\text{約} 215 \text{ nm}$) がサブコレクタ層103の上にそれぞれ形成されている。

【0050】

尚、本実施形態においてはエミッタ層106の厚さを $\text{約} 25 \text{ nm}$ としたが、これは、エミッタ層106の厚さが大きくなるにつれて、活性化エネルギーE_aが小さくなることが予測されるため、エミッタ層106の厚さを 30 nm 未満にすることが好ましいことによる。

【0051】

以下、このようなHBT100を作製する方法を説明する。まず、図1(a)を参照して、基板101の上に、バッファ層102、サブコレクタ層103、コレクタ層104、ベース層105、エミッタ層106、コンタクト層107、 그레이ディッド層108およびキャップ層109を、例えばMOCVD法(有機金属化学気相成長法)、MBE法(分子線エピタキシー)およびCBE法(ケミカルビームエピタキシー)等を用いてエピタキシャル成長により順次積層する。

【0052】

このようなエピタキシャル成長による層形成は、例えば、GaAs層の場合にはTEG(トリエチルガリウム)とAsH₃(アルシン)を、InGaP層の場合にはTEG、TMIn(トリメチルインジウム)およびPH₃(フォスフィン)を、InGaAs層の場合にはTEG、TMInおよびAsH₃をそれぞれ原料ガスに用いて実施できる。尚、AsH₃のかわりにTBA(ターシャリー・ブチル・フォスフィン)を用いてもよい。加えて、本実施形態においてp型ドーパントとしてCをドーピングしているが、Cドーパ層を形成する場合には、例えば、TMG(トリメチルガリウム)をドーピング材料として用いることができる。また、本実施形態においてn型ドーパントとしてSiをドーピングしているが、Siドーパ層を形成する場合には、例えばSiH₄(モノシラン)および/またはSi₂H₆(ジシラン)などをドーピング材料として用いることができる。また、Siの他に、例えばSn、SeまたはTeなどをn型ドーパントとしてドーピングしてもよく、この場合には、TESn(トリエチルスズ)、DESe(ジエチルセレン)、DETe(ジエチルテルル)などをそれぞれドーピング材料に用いることができる。原料ガスおよびドーピングする場合にはドーピング材料の流量比ならびにエピタキシャル成長装置内の圧力および温度等は、当業者であれば、形成すべき層の組成およびドーピングする場合にはドーパント濃度等に応じて適宜調節することができよう。

【0053】

その後、以上のようにして得られた積層体のキャップ層109の全面に、エミッタ電極下部層となるバリア層110a(WN層またはWSi層、厚さ $\text{約} 100 \text{ nm}$)をスパッタリングにより形成する。そして、フォトレジストマスク(図示せず)をバリア層110aの上に形成し、RIE等のドライエッチングによりバリア層110aをエッチングし、図1(a)に示すように、幅 $1 \mu\text{m}$ ×長さ $20 \mu\text{m}$ の大きさにバリア層110aを成形する。用いたフォトレジストマスクは、その後、除去する。

【0054】

次に、図1(b)を参照して、上記のように成形されたバリア層110aをマスクとし

て、キャップ層 109、グレイデッド層 108 およびコンタクト層 107 をウエットエッチングにより部分的に除去し、エミッタメサを形成する。

【0055】

そして、エミッタ電極形成領域およびベース電極形成領域を除く露出上面にレジストマスク（図示せず）を形成し、Pt、Ti、Pt および Au を蒸着により順次堆積させ、その後、マスクを除去することにより（換言すれば、リフトオフ法により）、図 1（b）に示すように、バリア層 110a の全面およびエミッタ層 106 の所定の領域上に、エミッタ電極上部層 110b およびベース電極 111（Pt/Ti/Pt/Au、いずれも厚さ約 50 nm）をそれぞれ同時に形成する。この結果、バリア層（エミッタ電極下部層）110a とエミッタ電極上部層 110b とが積層されて、エミッタ電極 110 を構成する。

【0056】

次に、図 1（c）を参照して、エミッタ電極 110 およびベース電極 111 を覆ってフォトリソマスク（図示せず）を形成し、エミッタ層 106、ベース層 105 およびコレクタ層 104 をサブコレクタ層 103 が露出するまでウエットエッチングにより部分的に除去し、ベースメサを形成する。用いたフォトリソマスクは、その後、除去する。

【0057】

そして、同じくリフトオフ法により、図 1（c）に示すように、サブコレクタ層 103 の所定の領域上に、コレクタ電極 112（AuGe/Ni/Au、それぞれ厚さ 約 100 nm、約 15 nm および約 100 nm）を形成する。そして、得られた基板を熱処理に付すことにより、コレクタ電極 112 およびベース電極 111 の合金化処理を行う。これにより、コレクタ電極 112 とサブコレクタ層 103 とのオーミック接触が確保されると共に、ベース電極 111 の合金化層がエミッタ層 106 を突き抜けて、ベース電極 111 とベース層 105 とのオーミック接触が確保される。

【0058】

次に、コレクタメサエッチング領域を除く露出上面にレジストマスクを形成し、サブコレクタ層 103 からバッファ層 102 が露出するまでウエットエッチングを行い、図 1（c）に示すように、コレクタメサを形成する。用いたレジストマスクは、その後、除去する。

【0059】

これにより、図 1（c）に示す本実施形態の HBT 100 が作製される。

【0060】

この HBT 100 において、ベース層 105 である p-GaAs 層中の C 濃度（ドーパント濃度）、およびエミッタ層 106 である n-In_yGa_{1-y}P 層の混晶比 y は、コレクタ層 104 の格子定数 a_c、ベース層 105 の格子定数 a_b、およびエミッタ層 106 の格子定数 a_e が、a_c > a_b > a_e の関係または a_c < a_b < a_e の関係を満たすように適切に選択することができる。

【0061】

本実施形態においては、コレクタ層 104 である GaAs 層の材料を同一として a_c を一定にしつつ、表 1 に示すように、ベース層 105 である p-GaAs 層中の C 濃度を約 $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ または約 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ として a_b の値を変化させ（図 2 を参照して後述する）、かつ、エミッタ層 106 である n-In_yGa_{1-y}P 層の混晶比 y を約 0.44 ~ 0.52 の範囲で変化させることにより a_e の値を変化させて、種々の HBT を作製した。

【0062】

【表 1】

ベース層およびエミッタ層材料

No.	ベース層 GaAs	エミッタ層 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{P}$
	C濃度(cm^{-3})	y
1	4×10^{19}	0.44
2	4×10^{19}	0.46
3	4×10^{19}	0.49
4	4×10^{19}	0.52
5	1×10^{20}	0.44
6	1×10^{20}	0.46
7	1×10^{20}	0.49

【0063】

尚、GaAs層の格子定数はC濃度が高くなるにつれて小さくなることは知られている。本発明者は、本発明の実施に先立ち、GaAs層中のC濃度を種々変化させ、上述した手順に従って格子定数を室温（約20～30℃）にて測定し、C濃度と格子不整合率の値との関係を得た。参考までに結果を図2に示す。図2に言う「格子不整合率（ppm）」は、ノンドープのGaAs層の格子定数 a_0 と、Cをドーピングしたp-GaAs層の格子定数 a_1 とを用いれば、 $(a_1 - a_0) / a_0 \times 10^6$ として与えられる。ノンドープのGaAs層の格子定数 a_0 は基準温度 T_0 （300K＝約27℃）にて約5.654 Åである。よって、当業者であれば、本発明者の得た図2のグラフに基づいて、所望の格子定数を有するGaAs層を形成することが可能となるであろう。

【0064】

上記のようにして得られる本実施形態のHBTについて、本明細書の課題を解決するための手段の欄にて上述した手順に従ってX線回折装置を用いて予め測定または決定した格子定数 a_c 、 a_b および a_e を表2に示す。表2の格子定数は室温（約20～30℃）における値であり、基準温度 T_0 ＝約27℃における格子定数 α_0 とみなして差し支えない（上述の式（3）を参照のこと）。また、接合温度 T_j を90℃と仮定し、これを式（3）の所定温度 T_1 に代入して、90℃の接合温度 T_j における格子定数 α を表2の基準温度 T_0 における各格子定数 α_0 について算出した。結果を表3に示す。尚、 β は、GaAs層では約 $6.86 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 、InGaP層では約 $5.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ である。尚、表2および3中、コレクタ層に対するベース層の格子不整合率（即ち、 $|a_b - a_c| / a_c \times 100$ （%））と、ベース層に対するエミッタ層の格子不整合率（即ち、 $|a_e - a_b| / a_b \times 100$ （%））をそれぞれ a_b および a_e に付記して（ ）内に示す（以下の表6および7も同様である）。

【0065】

【表 2】

格子定数(室温:20~30℃、代表的には27℃)

No.	コレクタ層 GaAs	ベース層 GaAs	エミッタ層 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{P}$
	$a_c(\text{\AA})$	$a_b(\text{\AA})$	$a_e(\text{\AA})$
1	5.654	5.650 (0.07%)	5.635 (0.27%)
2	5.654	5.650 (0.07%)	5.645 (0.09%)
3	5.654	5.650 (0.07%)	5.654 (0.07%)
4	5.654	5.650 (0.07%)	5.670 (0.35%)
5	5.654	5.648 (0.11%)	5.635 (0.23%)
6	5.654	5.648 (0.11%)	5.644 (0.07%)
7	5.654	5.648 (0.11%)	5.654 (0.11%)

【0066】

【表 3】

格子定数(接合温度:90℃)

No.	コレクタ層 GaAs	ベース層 GaAs	エミッタ層 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{P}$
	$a_c(\text{\AA})$	$a_b(\text{\AA})$	$a_e(\text{\AA})$
1	5.656	5.652 (0.07%)	5.637 (0.27%)
2	5.656	5.652 (0.07%)	5.647 (0.09%)
3	5.656	5.652 (0.07%)	5.656 (0.07%)
4	5.656	5.652 (0.07%)	5.672 (0.35%)
5	5.656	5.650 (0.11%)	5.637 (0.23%)
6	5.656	5.650 (0.11%)	5.646 (0.07%)
7	5.656	5.650 (0.11%)	5.656 (0.11%)

【0067】

以上により得られた各HBTについて信頼性試験を行った。信頼性試験の通電条件は、エミッターコレクタ間の電圧 $V_{ce} = 3.0\text{ V}$ 、および電流密度 $J_c = 100\text{ kA/cm}^2$ とし、環境温度（ひいては接合温度）をパラメータとして種々変化させて、それぞれの温度におけるMTTF（故障までの平均時間）を測定した。HBTの故障の判定については、電流増幅率 h_{fe} が初期値の80%以下となった時に故障とみなし、試験開始から故障時までの時間をMTTFとした。

【0068】

得られた結果をアレニウスプロットして得た各HBTについての回帰直線を図3(a)

および (b) に示す。図 3 (a) は、サンプル No. 1～4 (GaAs ベース層中 C 濃度 約 $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の場合) についての回帰直線を示すものであり、図 3 (b) は、サンプル No. 5～7 (GaAs ベース層中 C 濃度 約 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の場合) についての回帰直線を示すものである (添付の図面においてサンプル No. を矢印にて示し、他の図面においても同様とする)。また、これら直線から求めた各 HBT の活性化エネルギー E_a を表 4 に示す。

【0069】

【表 4】

活性化エネルギー E_a	
No.	$E_a(\text{eV})$
1	2.2
2	3.2
3	1.1
4	0.9
5	2.0
6	3.0
7	0.7

【0070】

表 2 および 3 において、サンプル No. 1～7 の HBT のうち、サンプル No. 1、2、5 および 6 の HBT において $a_c > a_b > a_e$ の関係が満たされており、これらは本発明の実施例に該当する。これに対して、サンプル No. 3、4 および 7 の HBT は比較例である。

【0071】

表 2～4 から、 $a_c > a_b > a_e$ の関係を満たすとき (サンプル No. 1、2、5 および 6 の場合) に E_a がより大きいことがわかる。 $a_c > a_b > a_e$ の関係を満たしていても、 a_e が a_b に比べて小さくなりすぎると E_a が小さくなる傾向が見られる (サンプル No. 1 と 2 および 5 と 6 をそれぞれ比較のこと) もの、好ましくは、ベース層に対するエミッタ層の格子不整合率が約 0.3% 以下のとき (サンプル No. 1、2、5 および 6 の場合) に、2.0 eV 以上の E_a を得ることができ、低温側での寿命 (MTTF) が延びることが確認された。特に、サンプル No. 2 および 6 の場合、3.0 eV 以上の E_a が得られたことから、ベース層に対するエミッタ層の格子不整合率が約 0.1% 以下であるときに、更に高い HBT 信頼性が実現された。

【0072】

また、 a_e の値が同じで、 a_b の値の異なるサンプル No. 1 と 5 および 2 と 6 をそれぞれ比較すると、 a_b が a_c により近いサンプル No. 1 および 2 の方が、サンプル No. 5 および 6 よりも E_a がより大きくなっていた。これは、コレクタ層に対するベース層の格子不整合率がより小さいためであると考えられることから、コレクタ層に対するベース層の格子不整合率もまた約 0.3% 以下であるのが好ましく、約 0.1% 以下であるのがより好ましい。

【0073】

サンプル No. 2 および 6 の HBT においては 3.0 eV 以上の大きな活性化エネルギー E_a が得られた。これら HBT の接合温度 $T_j = 230^\circ\text{C}$ での MTTF はそれぞれ約 150 万時間および約 130 万時間 (図示せず) であった。既知の HBT のうち最も高い活

性化エネルギーを有する HBT (c) の接合温度 $T_j = 230^\circ\text{C}$ での MTTF は約 12 万時間であり (図 8 の直線 (c) を参照のこと)、信頼性試験における通電条件が本実施形態のものよりも穏やかであることを無視しても、本実施形態の MTTF はこの約 10 倍の大きさであった。また、これより低い接合温度では、例えば、約 200°C 以下の接合温度では HBT (c) の 100 倍以上の MTTF が得られることが確認された。

【0074】

以上、室温および接合温度 T_j における格子定数 a_c 、 a_b 、 a_e の関係 (および不整合率の大きさ) に基づいて素子特性の改善について考察したが、更に、格子定数の温度依存性についても検討する。上述の式 (3) から理解されるように、格子定数は温度に凡そ比例してほぼ直線的に増加する。一例として、サンプル No. 2 の HBT に用いた各層について、格子定数の温度依存性を示す直線を図 4 に示す。直線 (a) は GaAs 層 (ノンドープ、コレクタ層) の格子定数 (a_c)、直線 (b) は C ドープ GaAs 層 (C 濃度 $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、ベース層) の格子定数 (a_b)、直線 (c) は $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{P}$ 層 ($y=0.46$ 、エミッタ層) の格子定数 (a_e) である。また、比較のために、直線 (d) として $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{P}$ 層 ($y=0.48$ 、エミッタ層) の格子定数 (a_e) を併せて図 4 に示す。

【0075】

直線 (a) ~ (c) から理解されるように、本実施形態のサンプル No. 2 の HBT では、図示する全温度範囲において $a_c > a_b > a_e$ の関係を満たす。よって、長寿命および高信頼性の HBT が確実に実現される。

【0076】

次に、サンプル No. 2 の HBT において直線 (c) の $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{P}$ 層 ($y=0.46$) に代えて、直線 (d) の $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{P}$ 層 ($y=0.48$) を用いた HBT について検討する。この場合、 120°C 未満の温度範囲では直線 (b) よりも直線 (d) の方が上方に位置し、 $a_c > a_b$ 、 $a_b < a_e$ となり、 $a_c > a_b > a_e$ の関係を満たさない。しかしながら、 120°C 以上の温度範囲では、直線 (b) よりも直線 (d) の方が下方に位置し、 $a_c > a_b > a_e$ の関係を満たす。従って、接合温度 T_j が 120°C 以上である HBT においては、長寿命および高信頼性が得られる。

【0077】

このように、格子定数への温度の影響を考慮し、少なくとも HBT の接合温度 T_j において $a_c > a_b > a_e$ の関係を満たすように本発明が実施され得る。例えば、HBT の熱抵抗 $R = 60^\circ\text{C}/\text{W}$ 、コレクターエミッタ間の電圧 $V_{ce} = 3 \text{ V}$ 、コレクタ電流 $I_c = 300 \text{ mA}$ の場合、接合温度 $T_j = \text{約 } 80^\circ\text{C}$ であるので、少なくともこの温度において所定の関係を満たすよう、格子定数 a_b 、 a_e および a_c を選ぶことが望ましい。

【0078】

(実施形態 2)

本実施形態は、エミッタアップ型の InP/InGaAs HBT およびその製造方法に関する。図 5 は、本実施形態の HBT 400 の概略断面図である。

【0079】

図 5 に示すように、本実施形態の HBT 400 は、基板 401 (半絶縁性 InP 基板、厚さ約 $625 \mu\text{m}$) の上に、サブコレクタ層 402 ($n\text{-In}_w\text{Ga}_{1-w}\text{As}$ 層 ($w=0.53$)、Si ドーピング、ドーパント濃度 約 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、厚さ 約 400 nm)、コレクタ層 403 ($i\text{-In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ 層 (y は後述するように選択する)、アンドーピング、厚さ 約 300 nm)、ベース層 404 ($p\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 層 (x は後述するように選択する)、C ドーピング、ドーパント濃度 約 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、厚さ 約 50 nm)、エミッタ層 405 ($n\text{-InP}$ 層、Si ドーピング、ドーパント濃度 約 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、厚さ 約 25 nm)、コンタクト層 406 ($n\text{-InP}$ 層、Si ドーピング、ドーパント濃度 約 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、厚さ 約 20 nm)、キャップ層 407 ($n\text{-In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ 層 ($z=0.53$)、Si ドーピング、ドーパント濃度 約 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、厚さ 約 100 nm) が順次積層さ

れた構造を有する。このHBT400において、図5に示すように、エミッタ電極408、ベース電極409およびコレクタ電極410（いずれもTi/Pt/Au、それぞれ厚さ 約50nm、約50nmおよび約100nmならびに全体厚さ 約200nm）がそれぞれキャップ層407、ベース層404およびサブコレクタ層402の上に形成されている。

【0080】

本実施形態のHBT400は、当業者であれば、実施形態1にて説明したHBT100の作製方法を参照して、作製することができるであろう。

【0081】

このHBT400において、コレクタ層403である $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ 層の混晶比 y と、ベース層404である $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ の混晶比 x は、コレクタ層403の格子定数 a_c 、ベース層404の格子定数 a_b 、およびエミッタ層405の格子定数 a_e が、 $a_c > a_b > a_e$ の関係または $a_c < a_b < a_e$ の関係を満たすように適切に選択することができる。

【0082】

本実施形態においては、エミッタ層405であるInP層の材料を同一として a_e と一定としつつ、表5に示すように、ベース層404である $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 層の混晶比 x を約0.52または約0.54として a_b の値を変化させ、かつ、コレクタ層403である $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ 層の混晶比 y を約0.48～0.56の範囲で変化させることにより a_c の値を変化させて、種々のHBTを作製した。

【0083】

【表5】

コレクタ層およびベース層材料

No.	コレクタ層 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$	ベース層 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$
	y	x
8	0.53	0.52
9	0.51	0.52
10	0.48	0.52
11	0.56	0.54
12	0.55	0.54
13	0.53	0.54

【0084】

上記のようにして得られる本実施形態のHBTについて、実施形態1と同様に、X線回折装置を用いて予め測定または決定した格子定数 a_c 、 a_b および a_e を表6に示す。表6の格子定数は室温（約20～30℃）における値であり、基準温度 T_0 ＝約27℃における格子定数 α_0 とみなして差し支えない（上述の式（3）を参照のこと）。また、接合温度 T_j を150℃と仮定し、実施形態1と同様に式（3）により、150℃の接合温度 T_j における格子定数を表6の各格子定数について算出した。結果を表7に示す。尚、 β は、InGaAs層では約 $5.69 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 、InP層では約 $4.75 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ である。

【0085】

【表 6】

格子定数(室温:20~30℃、代表的には27℃)

No.	コレクタ層 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$	ベース層 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	エミッタ層 InP
	$a_c(\text{\AA})$	$a_b(\text{\AA})$	$a_e(\text{\AA})$
8	5.869	5.863 (0.10%)	5.869 (0.10%)
9	5.858	5.863 (0.09%)	5.869 (0.10%)
10	5.847	5.863 (0.27%)	5.869 (0.10%)
11	5.882	5.873 (0.15%)	5.869 (0.07%)
12	5.878	5.873 (0.09%)	5.869 (0.07%)
13	5.869	5.873 (0.07%)	5.869 (0.07%)

【0086】

【表 7】

格子定数(接合温度:150℃)

No.	コレクタ層 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$	ベース層 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	エミッタ層 InP
	$a_c(\text{\AA})$	$a_b(\text{\AA})$	$a_e(\text{\AA})$
8	5.873	5.867 (0.10%)	5.872 (0.09%)
9	5.862	5.867 (0.09%)	5.872 (0.09%)
10	5.851	5.867 (0.27%)	5.872 (0.09%)
11	5.886	5.877 (0.15%)	5.872 (0.09%)
12	5.882	5.877 (0.09%)	5.872 (0.09%)
13	5.873	5.877 (0.07%)	5.872 (0.09%)

【0087】

以上により得られた各HBTについて、実施形態1と同様にして信頼性試験を行った。得られた結果をアレニウスプロットして得た各HBTについての回帰直線を、図6(a)および(b)に示す。図6(a)は、サンプルNo. 8~10 ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ベース層の混晶比 x =約0.52の場合)についての回帰直線を示すものであり、図6(b)は、サンプルNo. 11~13 ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ベース層の混晶比 x =約0.54の場合)についての回帰直線を示すものである。また、これら直線から求めた各HBTの活性化エネルギー E_a を表8に示す。

【0088】

【表 8】

活性化エネルギー E_a	
No.	$E_a(\text{eV})$
8	0.8
9	3.1
10	2.0
11	2.1
12	3.2
13	0.9

【0089】

表6および7において、サンプルNo. 8～13のHBTのうち、サンプルNo. 9および10のHBTにおいて $a_c < a_b < a_e$ の関係が満たされており、また、サンプルNo. 11および12のHBTにおいて $a_c > a_b > a_e$ の関係が満たされており、これらは本発明の実施例に該当する。これに対して、サンプルNo. 8および13のHBTは比較例である。

【0090】

表6～8から、 $a_c < a_b < a_e$ の関係を満たすとき（サンプルNo. 9および10の場合）または $a_c > a_b > a_e$ の関係を満たすとき（サンプルNo. 11および12の場合）に E_a がより大きいことがわかる。 $a_c < a_b < a_e$ の関係を満たしていても、 a_c が a_b に比べて小さくなりすぎると E_a が小さくなる傾向が見られる（サンプルNo. 9と10を比較のこと）。また、 $a_c > a_b > a_e$ の関係を満たしていても、 a_c が a_b に比べて大きくなりすぎると E_a が小さくなる傾向が見られる（サンプルNo. 11と12を比較のこと）。しかしながら、上記関係を満たしつつ、好ましくは、コレクタ層に対するベース層の格子不整合率が0.3%以下のとき（サンプルNo. 9、10、11および12の場合）に、2.0eV以上の E_a を得ることができ、低温側での寿命(MTTF)が延びることが確認された。特に、サンプルNo. 9および12の場合に3.0eV以上の E_a が得られたことから、コレクタ層に対するベース層の格子不整合率が0.1%以下であるときに、更に高いHBT信頼性が実現された。

【0091】

また、ベース層に対するエミッタ層の格子不整合率についても同様に約0.3%以下であるのが好ましく、約0.1%以下であるのがより好ましい。

【0092】

以上、本発明の2つの実施形態について説明してきたが、本発明はこれら実施形態に限定されず、種々の改変がなされ得るであろう。本発明のHBTは、 $a_c > a_b > a_e$ の関係または $a_c < a_b < a_e$ の関係を満たす限り、任意の適切な構造を有してよく、任意の適切な材料から成り得る。

【0093】

上記実施形態1および2では、基板上にコレクタ層、ベース層およびエミッタ層が順に積層されて、エミッタ層がコレクタ層およびベース層よりも基板に対して上側に位置する、エミッタアップ型のHBTについて説明した。しかし、本発明はこれに限定されず、基板上にエミッタ層、ベース層およびコレクタ層が順に積層されて、コレクタ層がエミッタ層およびベース層よりも基板に対して上側に位置する、コレクタアップ型のHBTに本発明を適用してもよい。この場合、ベース層に対するコレクタ層の格子不整合率およびエミッタ層に対するベース層の格子不整合率の少なくとも一方、好ましくは双方が、0.3%

以下、好ましくは0.1%以下とされる。

【0094】

また、上記実施形態1および2では、エミッタ層のみにワイドバンドギャップを用いたシングルHBTについて説明したが、エミッタ層およびコレクタ層にワイドバンドギャップを用いたダブルHBTに本発明を適用してもよい。例えば、実施形態1の場合、コレクタ層にInGaP層などを用いてもよい。この場合、各層の格子定数の関係が $a_c > a_b > a_e$ の関係または $a_c < a_b < a_e$ の関係を満たすように適宜改変することにより、HBTの高信頼性化を図ることができる。

【0095】

尚、実施形態1では、バッファ層、サブコレクタ層、コンタクト層、グレイティッド層およびキャップ層を設け、また、実施形態2ではサブコレクタ層、コンタクト層およびキャップ層を設けたが、これらは本発明の実施に必ずしも必要でないことに留意されたい。

【0096】

(実施形態3)

本実施形態は実施形態1の改変例であり、二層構造のエミッタ層を備えるHBTに関する。本実施形態のHBTは、図1(c)のHBT100を参照して、エミッタ層106が、ベース層105の上に積層された第1エミッタ層106a(n-In_yGa_{1-y}P層(y=0.46)、Siドーピング、ドーパント濃度 約 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、厚さ 約25nm)と、第1エミッタ層106aの上に積層された第2エミッタ層106b(n-In_{y'}Ga_{1-y'}P層(y'=0.43)、Siドーピング、ドーパント濃度 約 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、厚さ 約25nm)とから構成される点を除いてHBT100と同様の構成を有する。本実施形態においては、ベース層105であるp-GaAs層中のC濃度は約 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ とする。本実施形態のHBTは、当業者であれば、実施形態1を参照することにより作製できるであろう。

【0097】

上記のようにして得られる本実施形態のHBTについて、実施形態1と同様に、X線回折装置を用いて予め測定または決定した格子定数 a_c 、 a_b および a_e を表9に示す。表9の格子定数は室温(約20~30℃)における値であり、基準温度 T_0 =約27℃における格子定数 a_0 とみなして差し支えない(上述の式(3)を参照のこと)。また、接合温度 T_j を85℃と仮定し、実施形態1と同様に式(3)により、85℃の接合温度 T_j における格子定数を表9の各格子定数について算出した。結果を表10に示す。尚、表9および10中、コレクタ層に対するベース層の格子不整合率(即ち、 $|a_b - a_c| / a_c \times 100$ (%))と、ベース層に対する第1エミッタ層の格子不整合率(即ち、 $|a_{e1} - a_b| / a_b \times 100$ (%))と、ベース層に対する第2エミッタ層の格子不整合率(即ち、 $|a_{e2} - a_b| / a_b \times 100$ (%))をそれぞれ a_b 、 a_{e1} および a_{e2} に付記して()内に示す。

【0098】

【表9】

格子定数(室温:20~30℃、代表的には27℃)

No.	コレクタ層 GaAs	ベース層 GaAs	第1エミッタ層 In _y Ga _{1-y} P	第2エミッタ層 In _{y'} Ga _{1-y'} P
	$a_c(\text{\AA})$	$a_b(\text{\AA})$	$a_{e1}(\text{\AA})$	$a_{e2}(\text{\AA})$
14	5.654	5.648 (0.11%)	5.645 (0.05%)	5.630 (0.32%)

【0099】

【表 10】

格子定数(接合温度:85°C)

No.	コレクタ層	ベース層	第1エミッタ層	第2エミッタ層
	GaAs	GaAs	$\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{P}$	$\text{In}_{y'}\text{Ga}_{1-y'}\text{P}$
	$a_c(\text{\AA})$	$a_b(\text{\AA})$	$a_{e1}(\text{\AA})$	$a_{e2}(\text{\AA})$
14	5.656	5.650 (0.11%)	5.647 (0.05%)	5.632 (0.32%)

【0100】

表9および10から、本実施形態においては、コレクタ層の格子定数 a_c 、ベース層の格子定数 a_b および第2エミッタ層の格子定数 a_{e2} が、 $a_c > a_b > a_{e2}$ の関係を満たすことがわかる。また、ベース層に対する第2エミッタ層の格子不整合率は0.32%であり、0.3%を超える。他方、ベース層に対する第1エミッタ層の格子不整合率は0.05%であり、0.1%以下である。

【0101】

本実施形態によれば、第1エミッタ層がHBT特性（より詳細にはエミッターベース間のバンドギャップ）に大きく寄与しているので、第1エミッタ層の材料を適切に選択することにより、所望のバンド構造を実現でき、HBTの特性を維持することができる。更に、本実施形態によれば、第2エミッタ層およびベース層の格子定数をずらし、第2エミッタ層がベース層に対して0.3%を超える歪を有するようにしているので、第2エミッタ層の歪の影響が第1エミッタ層とベース層に及び、高信頼性のHBTを得ることができる。

【0102】

本実施形態においては、第1エミッタ層の厚さを約25nmとしたが、より薄く、例えば10nm以下とすることが好ましい。このように第1エミッタ層を薄くすると、第1エミッタ層が第2エミッタ層の歪の影響を受け易くなり、高信頼性を得ながら、HBT特性を容易にコントロールすることができるという利点がある。

【0103】

また、本実施形態3ではエミッタ層を二層構造としたが、コレクターベース間のバンド構造の変化が問題となる場合にはコレクタ層を二層構造としてもよく、エミッタ層およびコレクタ層の双方を二層構造としてもよい。

【0104】

以上、実施形態1～3を通じて本発明のHBTを説明して来たが、本発明の目的および概念を逸脱しない範囲で種々の改変がなされ得るであろう。

【図面の簡単な説明】

【0105】

【図1】本発明の1つの実施形態におけるHBTの製造方法を、積層方向を含む概略断面を示して説明する工程図である。

【図2】GaAs層の格子定数のGaAs層中のC濃度依存性を示すグラフである。

【図3】図3(a)および(b)は、本発明の1つの実施形態におけるサンプルNo. 1～4および5～7のHBTについての信頼性試験の結果をそれぞれ示す図である。

【図4】格子定数の温度依存性を示すグラフであり、(a)はGaAs層、(b)はCドープGaAs層(C濃度 $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)、(c)は $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{P}$ 層($y=0.46$)、(d)は $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{P}$ 層($y=0.48$)の格子定数を示す。

【図5】本発明のもう1つの実施形態におけるHBTの概略断面図である。

【図6】図6(a)および(b)は、本発明の1つの実施形態におけるサンプルNo.

． 8 ～ 1 0 および 1 1 ～ 1 3 の H B T についての信頼性試験の結果をそれぞれ示す図である。

【図 7】従来の 1 つの例における H B T の概略断面図である。

【図 8】従来の H B T についての信頼性試験の結果を示す図である。

【符号の説明】

【 0 1 0 6 】

1 0 0、4 0 0 H B T (ヘテロ接合バイポーラトランジスタ)

1 0 1、4 0 1 基板

1 0 2 バッファ層

1 0 3、4 0 2 サブコレクタ層

1 0 4、4 0 3 コレクタ層

1 0 5、4 0 4 ベース層

1 0 6、4 0 5 エミッタ層

1 0 7、4 0 6 コンタクト層

1 0 8 グレイディッド層

1 0 9、4 0 7 キャップ層

1 1 0 a バリア層 (エミッタ電極下部層)

1 1 0 b エミッタ電極上部層

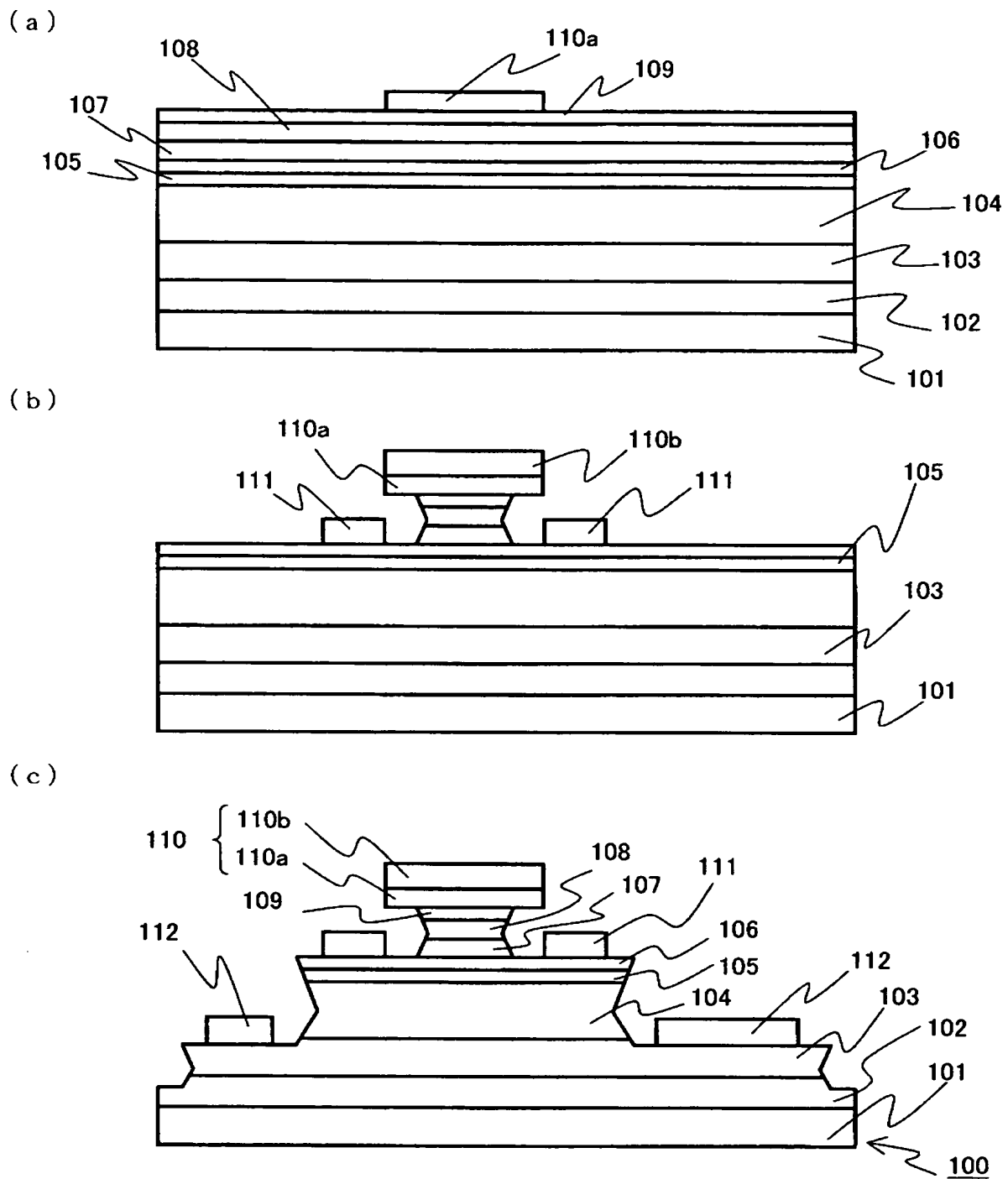
1 1 0、4 0 8 エミッタ電極

1 1 1、4 0 9 ベース電極

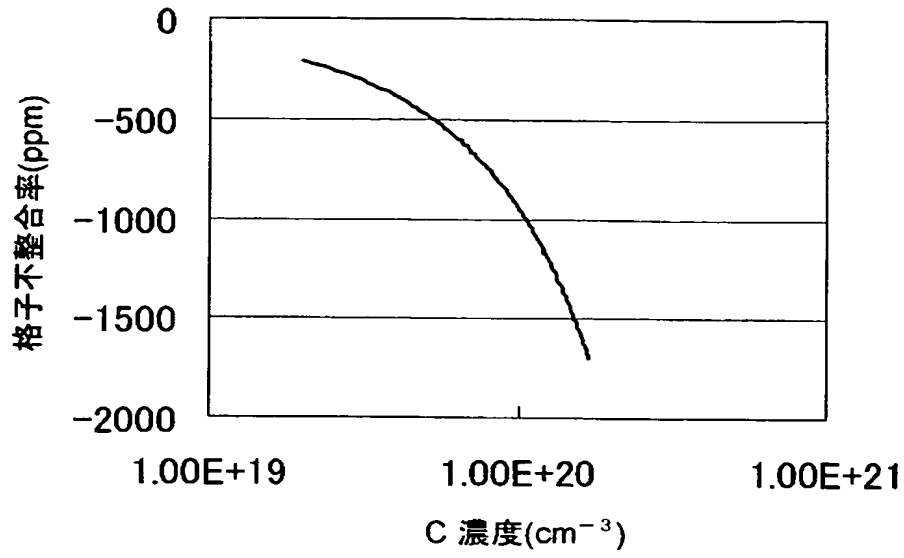
1 1 2、4 1 0 コレクタ電極

【書類名】 図面

【図 1】

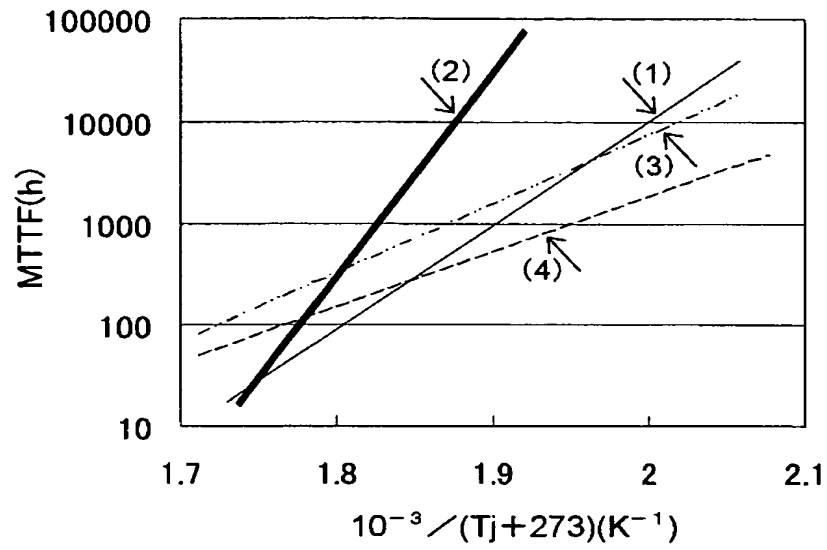


【図 2】

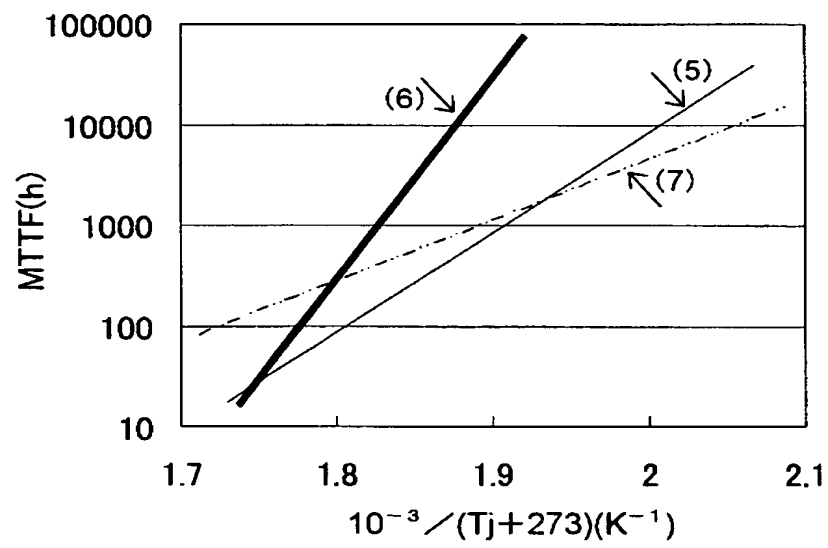


【図 3】

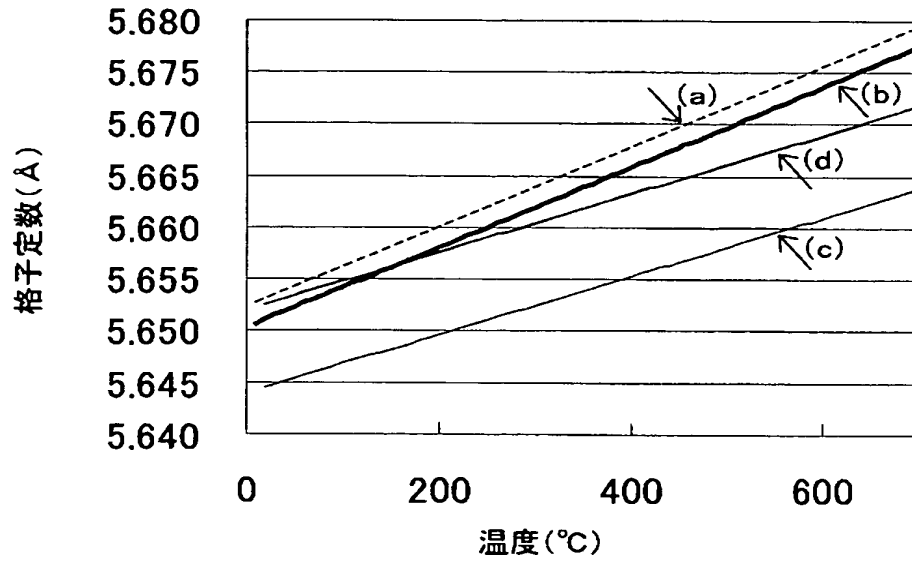
(a)



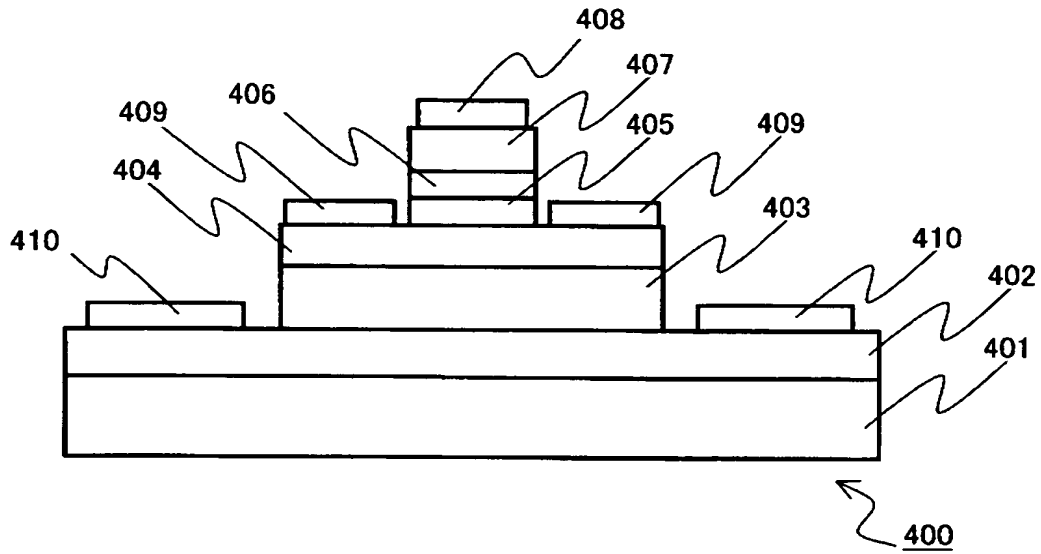
(b)



【図 4】

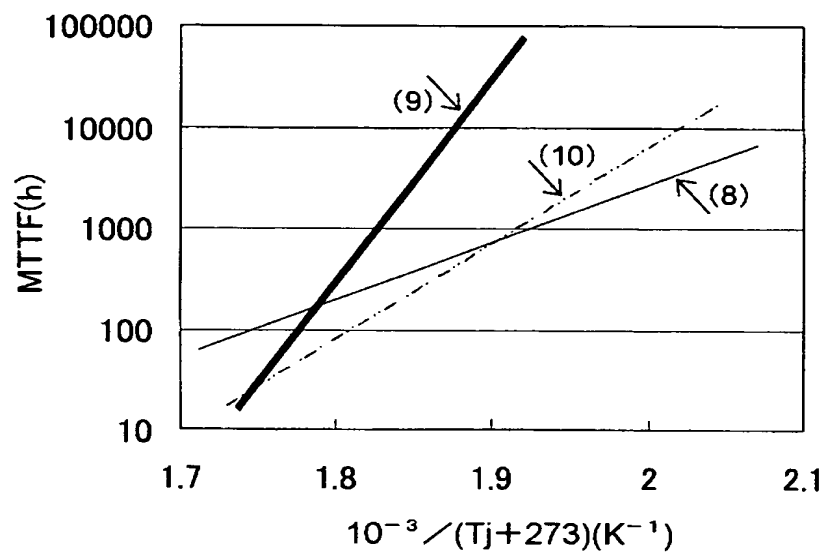


【図 5】

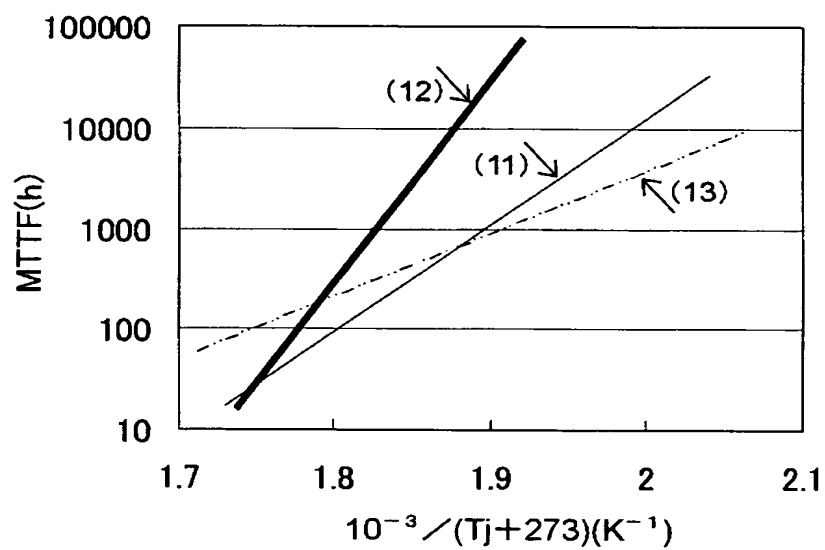


【図 6】

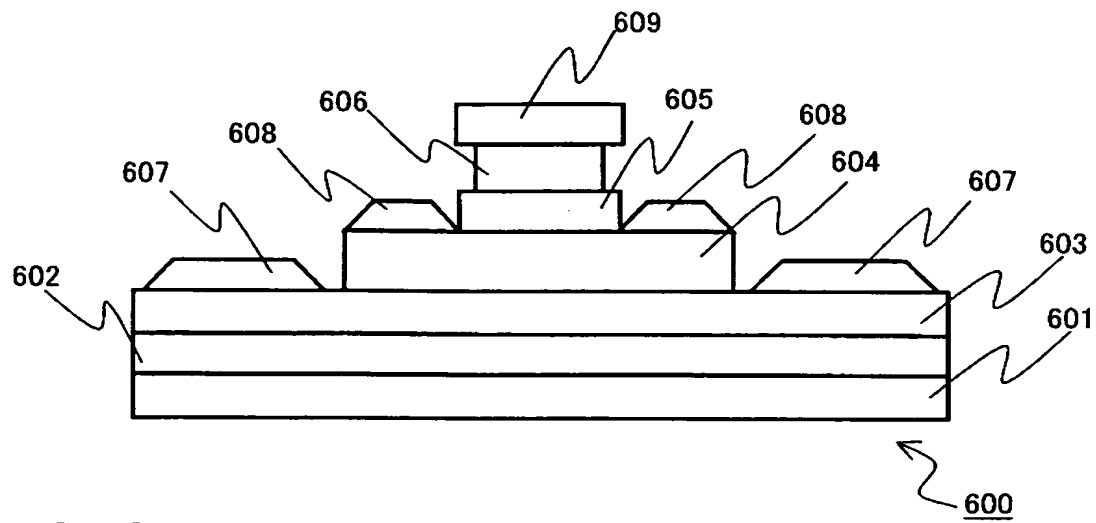
(a)



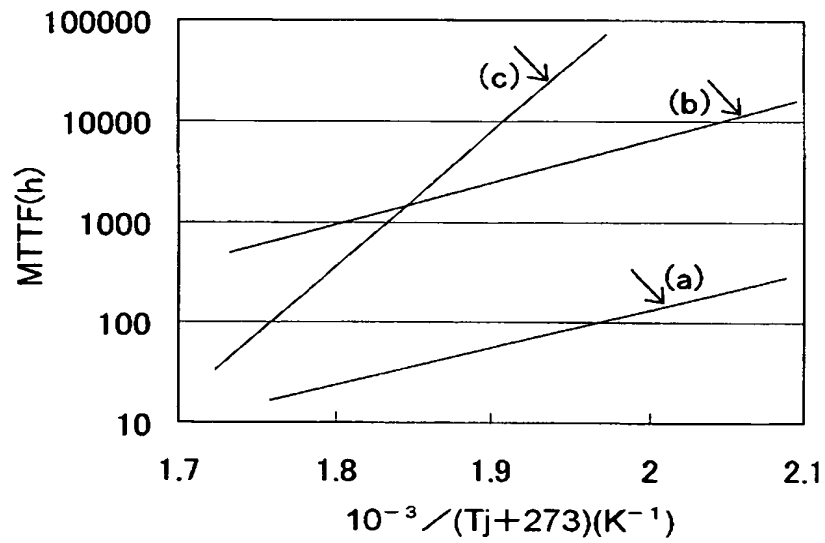
(b)



【図 7】



【図 8】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 HBTを製造するための既存の設備および製造工程を大幅に変更することなく、高信頼性のヘテロ接合バイポーラトランジスタ（HBT）を提供する。

【解決手段】 コレクタ層104、ベース層105およびエミッタ層106を備えるヘテロ接合バイポーラトランジスタ（HBT）100を、コレクタ層104、ベース層105およびエミッタ層106が異なる格子定数 a_c 、 a_b および a_e をそれぞれ有し、 a_b が a_c および a_e の間の値となるように（換言すれば、 a_c 、 a_b および a_e が $a_c > a_b > a_e$ または $a_c < a_b < a_e$ の関係を満たすように）構成する。

【選択図】 図1

特願 2 0 0 3 - 3 1 8 6 6 8

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[0 0 0 0 0 5 0 4 9]

1. 変更年月日

1 9 9 0 年 8 月 2 9 日

[変更理由]

新規登録

住 所

大阪府大阪市阿倍野区長池町 2 2 番 2 2 号

氏 名

シャープ株式会社